

А. В. Желнина^{1, 2*}, А. Г. Илларионов¹, М. С. Калиенко^{1, 2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

² ПАО «Корпорация ВСМПО АВИСМА», Верхняя Салда

* *avzhelnina@gmail.com*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *А. А. Попов*

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В СПЛАВЕ Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА В ТЕРМОУПРОЧНЕННОМ СОСТОЯНИИ

В работе изучено влияние различного содержания примесей внедрения (кислорода, углерода) на температуру полного полиморфного $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ -превращения ($T_{\text{пп}}$) и комплекс свойств в термоупрочненном состоянии титанового сплава Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr. Показана возможность определения $T_{\text{пп}}$ сплава методом дифференциальной сканирующей калориметрии с точностью сопоставимой с методом пробных закалок.

Ключевые слова: титановый сплав VST55531, примеси внедрения, упрочняющая термическая обработка, температура полиморфного превращения титановых сплавов.

A. V. Zhelnina, A. G. Illarionov, M. S. Kalienko

THE EFFECT OF IMPURITIES ON β -TRANSUS TEMPERATURE AND PROPERTIES OF Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr ALLOY

The effect of interstitial impurities (oxygen, carbon) different content on β -transus temperature and complex of properties in the heat-strengthened condition of the Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr titanium alloy has been studied. The possibility of determining alloy β -transus temperature by the differential scanning calorimetry method with accuracy comparable with the test quenching method is shown in this paper.

Keywords: titanium alloy VST55531, alloying elements, hardening heat treatment, β -transus temperature, differential scanning calorimetry, test quenching method.

Сплав Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr относится к высокопрочным термически упрочняемым титановым сплавам, используемым для изготовления крупногабаритных деталей шасси и планера самолетов [1].

$T_{\text{пп}}$ сплава является важной его характеристикой от которой зависит температура закалки и режимы деформации полуфабрикатов. $T_{\text{пп}}$ на производстве определяют достаточно трудоемким методом пробных закалок (ПЗ) [2]. В качестве альтернативы этому методу всё более широко используют методы термического анализа – термоэлектрический [3], и особенно дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [4, 5].

Увеличение содержания кислорода, углерода в сплавах титана даёт эффективное повышение прочностных свойств [6, 7], влияет на формирование фазового состава и текстуры [8] и приводит к снижению пластичности [9]. В тоже время использование сплавов титана с высоким содержанием примесей способствует снижению производственных затрат из-за снижения требований к качеству шихтовых материалов.

В работе поставлена цель изучить влияние содержания примесей (кислорода, углерода) на $T_{\text{пп}}$ и комплекс свойств деформированных полуфабрикатов из титанового сплава Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr.

Материал и методика исследования

Исходным материалом для исследования служили деформированные в $(\alpha+\beta)$ -области поковки из сплава Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr с различным содержанием примесей, таких как кислород и углерод. Структурные алюминиевый и молибденовый эквиваленты сплавов ($[Al]_{\text{стр. экв.}}$ и $[Mo]_{\text{стр. экв.}}$), и содержание примесей внедрения в них приведены в таблице 1. Составы подобраны так, что отличаются главным образом по $[Al]_{\text{стр. экв.}}$ за счёт изменения содержания примесей, а $[Mo]_{\text{стр. экв.}}$ практически одинаков.

Таблица 1

Данные по химическому составу сплавов Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–1Zr

Сплав	Содержание примесей, мас. %				$[Al]_{\text{стр. экв.}}$	$[Mo]_{\text{стр. экв.}}$
	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>Zr</i>		
1	0,176	0,009	0,005	0,99	7,0	14,89
2	0,25	0,025	0,004	0,91	7,86	14,40

Определение $T_{\text{пп}}$ сплавов проводилось методом пробных закалок с шагом в 5 °С, а также методом (ДСК) на приборе синхронного термического анализа STA 449 C Jupiter по методике из диссертации [10]. Нагрев и охлаждение образцов проводили в инертной атмосфере аргона.

Сплавы перед механическими испытаниями были подвергнуты упрочняющей термической обработке – закалке в воду из $(\alpha+\beta)$ -области (выдержка 4 часа) и старению в течение 8-ми часов в диапазоне температур 580 ÷ 660 °С.

Определение механических характеристик при испытании на растяжение проводилось на разрывной машине Insight-200 на образцах,

вырезанных из поперечного сечения поковки. Для испытания на вязкость разрушения с определением параметра K_{IC} в поперечно-высотном направлении использовали машину MTS Landmark 250. Микроанализ осуществляли на микроскопе LEICA DMI 5000M.

Результаты и их обсуждение

Значения $T_{пп}$, определенные методом ПЗ, сплавов 1,2 приведены в табл. 2 и видно, что с увеличением содержания примесей от сплава 1 к сплаву 2 происходит закономерное увеличение $T_{пп}$.

На рис. 1 представлена зависимость изменения объёмной доли первичной α -фазы от температуры нагрева под закалку. Увеличение содержания примесей внедрения кислорода до 0,25 мас. % и углерода до 0,025 мас. % сдвигает область растворимости частиц α -фазы в сторону более высоких температур, затрудняя процесс растворения α -фазы в β -твёрдом растворе вблизи $T_{пп}$ (плато на кривой для сплава 2).

Таблица 2

Данные по $T_{пп}$, полученные методами ПЗ и ДСК

№ сплава	1	2
$T_{пп}$, °C (ПЗ)	868	883
$T_{пп}$, °C (ДСК)	865	879

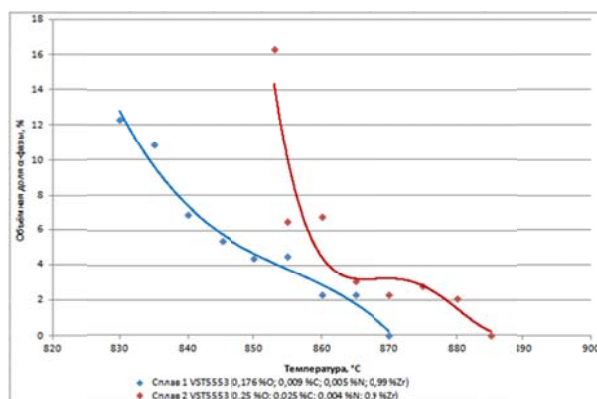


Рис. 1. Изменение объёмной доли α -фазы с температурой закалки сплавов 1,2

Анализ кривых ДСК повторного нагрева (рис. 2), для сплавов 1,2 показал, что для них характерно наличие неярко выраженного эндоэффекта в области температур нагрева выше 800 °C, связанного с протеканием $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ -превращения. На линиях производных с этих кривых ДСК в области эндоэффекта появляются пики у которых температура максимума (T_{dmax}) находится в области более высоких температур в сплаве 2, имеющем более высокий $[Al]_{стр. экв.}$. $T_{пп}$ сплавов, рассчитанная исходя из T_{dmax} и $[Mo]_{стр. экв.}$ [10], представлена в табл. 2. Разница между значениями $T_{пп}$ определенными методами ДСК и ПЗ составляет 3–4 °C и сопоставима с погрешностью метода ПЗ.

Изменение механических свойств в поперечном сечении поковок исследуемых составов сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr от температуры старения представлено на рис. 3, а, б. Видно, что по мере увеличения температуры старения наблюдается закономерное понижение прочностных и повышение пластических характеристик (рис. 3, а, б). При этом увеличение содержания примесей от сплава 1 к сплаву 2 способствует при одинаковых температурах старения получению более высоких прочностных и низких пластических характеристик (рис. 3).

На образцах, состаренных при температуре 620 °С, определена вязкость разрушения (K_{IC}). Полученные значения K_{IC} (42 МПа·√м – сплав 1, 32 МПа·√м – сплав 2) свидетельствуют, что с увеличением [Al]_{стр экв} и содержания примесей от сплава 1 к сплаву 2 происходит снижение вязкости разрушения.

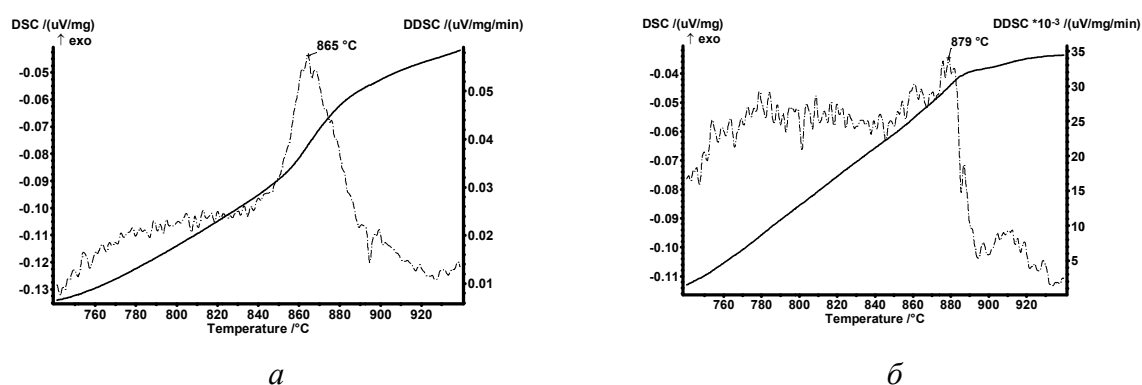


Рис. 2. Кривые ДСК повторного нагрева (сплошные линии) и соответствующие им дифференциальные кривые (пунктирные линии) для сплавов 1 (а) и 2 (б)

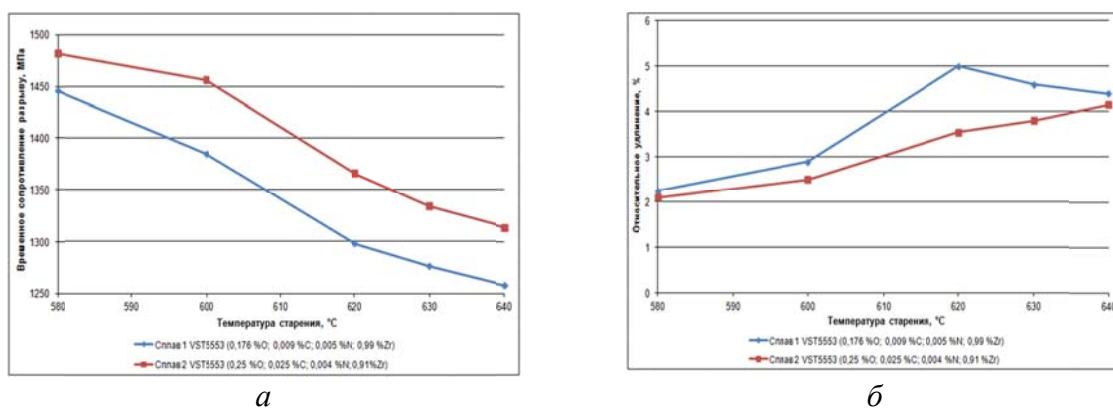


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления разрыву (а), относительного удлинения (б) от температуры старения сплавов 1 и 2 после УТО

На основании проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. Увеличение содержания кислорода до 0,25 мас. % и углерода до 0,025 мас. % в сплаве Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr затрудняет процесс растворения α -фазы в β -твёрдом растворе вблизи $T_{пп}$.

2. Определенные методом ДСК значения $T_{\text{пп}}$ сплавов 1,2 находятся в хорошем соответствии со значениями $T_{\text{пп}}$, полученными методом пробных закалок.
3. Увеличение содержания примесей кислорода и углерода от сплава 1 к сплаву 2 способствует при одинаковых температурах старения получению более высоких прочностных характеристик и низких характеристик пластичности и вязкости разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. State of the Art in Beta Titanium Alloys for Airframe Applications / James D. Cotton [et al.] // JOM. 2015. Vol. 67. № 6. P. 1281–1303.
2. Полуфабрикаты из титановых сплавов / К. В. Александров [и др.]. Москва : Металлургия, 1979. 512 с.
3. Илларионов И. А. Использование методов термического анализа для определения температуры полиморфного превращения в высоколегированном сплаве титана на основе α -фазы / И. А. Илларионов, С. М. Илларионова // Труды XVI Международной Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых. Екатеринбург, 2015. С. 263–265.
4. Clement N. Comparison of microstructure and mechanical properties of the metastable beta titanium alloys Ti-LCB and Ti-555 / N. Clement, A. Lenain, P. J. Jacques // «Ti-2007 Science and Technology». Proceedings of the 11 th World Conf. on Titanium. Kyoto, 2007. Vol. 1. P. 495–498.
5. Использование метода термического анализа для определения температуры полного полиморфного превращения двухфазного титанового сплава / Д. В. Гадеев [и др.] // Титан. 2010. № 1. С.24–30.
6. Kahveci A. I. Effect of oxygen on the hardness and alpha/beta phase ratio of Ti–6Al–4V alloy / A. I. Kahveci, G. Welsh // Scripta Metall. 1986. Vol. 20. P. 1287–1290.
7. Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium / H. Conrad // Progress in Materials Science. 1981. Vol. 26 (2–4). P. 123–403.
8. Babareko A. A. Effect of supplementary alloying of titanium alloy VT23 on its phase composition and tendency to recrystallization / A. A. Babareko, I. V. Egiz, M. A. Khorev // Metal Science and heat treatment. 1993. Vol. 35, № 2. P. 116–120.
9. Liu Z. Effects of oxygen and heat treatment on the mechanical properties of alpha and beta titanium alloys / Z. Liu, G. Welsh / Met. Trans. A. 1988. Vol. 19A, № 3. P. 527–542.
10. Гадеев Д. В. Исследования фазовых превращений методами структурного и термического анализа в двухфазных сплавах на основе титана: дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Гадеев. Екатеринбург : УрФУ, 2012. 158 с.